

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0049

高昂, 吴时强. 抽水蓄能电站侧式进出水口体型及水力特性研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 132-139. GAO A, WU S Q. Progress of research on structure and flow characteristics of lateral inlet/outlet of pumped storage power station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 132-139. (in Chinese)

抽水蓄能电站侧式进出水口体型及水力特性研究进展

高昂^{1,2}, 吴时强¹

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 2. 武汉大学, 武汉 430072)

摘要: 侧式进出水口是抽水蓄能电站广泛采用的水流过渡结构形式, 是连接库区与输水管道的咽喉。该部位双向过渡水流结构较为复杂, 对工程的运行效率及安全有重要影响, 而合理的进出口体型是保证水流合理过渡和工程安全的关键。研究侧式进出水口体型及水力特性的方法主要有物理模型试验、数值模拟及原型观测。文章对进出口口前漩涡、进出口段水流过渡和水头损失等方面研究成果加以总结。分析了漩涡形成机理、诱导因素及抑制漩涡形成的工程与非工程措施; 明确了均衡过渡水流的工程要求及满足水流均衡过渡的结构体型设计准则; 列举了部分工程进出水口体型参数、过渡水流特征数及进出流水头损失系数。

关键词: 抽水蓄能电站; 侧式进出水口; 水力特性; 结构设计

中图分类号: TV 732.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0132-08

Progress of research on structure and flow characteristics of lateral inlet/outlet of pumped storage power station

GAO Ang^{1,2}, WU Shiqiang¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Lateral inlet/outlet is the widely used form of flow transition structure in pumped storage power stations, and is always considered as the throat connecting the reservoir and water pipes. The two direction flow structure of the lateral inlet/outlet is complicated and affects the operation efficiency and safety of engineering. The reasonable structure type of lateral inlet/outlet is the key to ensuring reasonable flow transition and engineering safety. The methods for studying the shape and hydraulic characteristics of lateral inlet/outlet mainly include physical model test, numerical simulation, and prototype observation. This paper summarizes the research results on the vortex flow, flow transition, and head loss at the lateral inlet/outlet. It analyzes the forming mechanism of vortex, the factors that induce vortex, and the engineering and non engineering measures to inhibit vortex formation. It defines the engineering requirements of equilibrium transition flow and the structure design criteria that satisfy the equilibrium transition of flow. It also lists the structure parameters, transition flow characteristic numbers, and the water head loss coefficients at the lateral inlet/outlet of some projects.

Key words: pumped storage power station; lateral inlet/outlet; flow characteristic; structural design

我国经济建设的快速发展对电力供给量及供给稳定性与持续性的要求持续增高, 抽水蓄能电站作为一种清洁、经济、可靠的储能发电装置, 起着电力系统稳定调节器的作用, 在电力系统中的重要性日益凸显^[1]。水电发展“十三五”规划(2016-2020

年)中指出要适度加快抽水蓄能电站建设步伐, 计划“十三五”期间开工抽水蓄能电站6000万千瓦左右。在迎来抽水蓄能电站新一轮建设浪潮的同时, 如何保证电站安全运行, 并进一步提高其能量转化效率是水电工作者密切关注的焦点。

收稿日期: 2017-06-26 修回日期: 2017-09-19 网络出版时间: 2018-01-10
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180109.0957.004.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51379128)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51379128)

作者简介: 高昂(1991-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事水工水力学方面的研究。E-mail: gaoang@whu.edu.cn

通讯作者: 吴时强(1964-), 男, 浙江诸暨人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事计算水力学、环境水力学研究。E-mail: sqwu@nhri.cn

侧式进出水口是抽水蓄能电站压力隧洞与水库之间的衔接性水工建筑物,需对压力隧洞与水库进行合理的衔接,保障进出水口具有良好的水力学指标。基于这种需求,侧式进出水口大都布置为在竖向与横向均有所扩散的基本型式,并采用分流隔墩形成二隔墩三流道或三隔墩四流道的布置格局,结构体型较为复杂。如若体型设计不当,容易造成不利的水流流态,对电站的经济效益与安全运行产生不利影响^[2]。

归纳已有试验研究成果和原型观测资料发现,侧式进出水口水流易存在以下三个问题:(1)入流时(由库区进入输水管道)有害吸气漩涡问题;(2)双向水流均衡过渡问题,包括不同通道间流量分配不均问题及单个通道内流速分布不均等问题;(3)水头损失问题。针对上述水流问题,前人又采取了有效的调控措施。本文对侧式进出水口水流问题及为解决这些问题而采取的调控措施两大方面进行综述。

1 进出水口水流漩涡现象

根据进出水口漩涡的形态特征,将其定性地分为不吸气漩涡、间歇性吸气漩涡和贯通式吸气漩涡^[3]。其中,贯通式吸气漩涡对电站运行危害最大^[4],主要包括以下四方面:(1)吸入的空气泡易导致水轮机叶片压力分布失衡,可能造成机组振动破坏;(2)水面漂浮物易被贯通式吸气漩涡卷入水体,造成拦污栅堵塞甚至破坏;(3)漩涡携带的空气进入输水通道后,减小了过流面积,增大了过流阻力,从而降低了输水通道过流能力;(4)漩涡挟带空气形成的有旋流动使得机组在非设计条件下运行,会导致机组工作效率的降低。因此,探讨漩涡尤其是贯通式吸气漩涡的形成机理,确定漩涡产生及发展的决定因素,探寻有效的消涡措施是流体力学理论研究中具有挑战性的课题,也是工程实际中迫切需要解决的问题^[5]。

1.1 进出水口漩涡形成的机理

漩涡运动的复杂性及研究方法的局限性导致对漩涡形成及发展机理研究不能深入,漩涡问题的理论研究一直难以取得突破性进展,人们还未对漩涡形成、发展过程及机理达成共识。因此对漩涡形成的动力学过程进行直观描述,获得清晰明确的认识,并在此基础上对漩涡形成及发展机理进行科学阐述显得尤为重要。不少学者采用模型试验方法对侧式进出水口漩涡的形成、发展机理进行了规律性探究。

陈云良^[6]认为进水口前表层水体受胸墙阻滞,部分水体动能转化为势能,在胸墙前形成水位壅高的滞流区。滞流区水体受到空间三维流速的综合影

响,水体压力和内剪力平衡极易被破坏,产生一定的环量。同时,在进水口泄流作用下,进水口上方水体极易失稳,产生向进水口运动的加速度。水体在环流和重力双重作用下发生复杂的三维运动,就有可能诱发漩涡形成。

严根华^[7]通过物理模型试验,发现进水口上方滞水区是一个剪切流流场,滞水区上方水流受胸墙阻碍而减速,滞水区下方水流受进口水流拖动而加速,剪切场内水体发生复杂的紊动翻滚,为成涡提供了基本条件。在波浪和风等外力的随机作用下,不同流速水体发生剪切运动为成涡提供了主要动力。

杜敏^[8]基于紊流能量的串联特点,构建了一个“漩涡能量平衡”模型,对漩涡的形成过程描述如下:进水口前水体在固体障碍物干扰下发生立轴圆柱型旋转运动,圆柱体水体外环能量不同程度的向圆柱中心集中,中心附近水体流速逐渐增大并超过外环水体流速,圆柱形旋转水体在进水口泄流形成的不均匀急变流作用下被逐渐拉伸,中心附近的水面逐渐下凹形成空气通道,直至与进水口贯通形成贯通式吸气漩涡。

王英奎^[9]认为进水口前较大体积的滞流区为漩涡产生和发展创造了条件,而滞流区大小由淹没水深决定,分析了水深由小到大(漩涡从无到有再到无)过程中自由水体与滞流区水体的博弈过程及漩涡形成、发展过程。指出漩涡具有表面环流和点汇流的双重属性,并引用“点汇球形临界面”(CSSS)概念^[10],考虑表面环流和点汇流动两个主要影响因素,分析了临界淹没水深的下限。

上述成果对漩涡形成过程及机理进行了理论探讨,形成了初步共识:进水口不合理边界形状及不平衡外力造成的水流初始环量为漩涡形成营造了基本条件,进水口泄流拖曳前缘水体为漩涡形成提供主要动力,水体粘性力则起着使漩涡附近水质点持续参与到漩涡运动中的联结作用,漩涡运动具有表面环流和点汇流的双重属性。这些研究为厘清成涡因素及合理设置消涡措施提供了基础依据。

1.2 进出水口漩涡影响因素及条件

漩涡形成主要与进出水口前缘地形边界、进出水口体型及其水力特性有关^[11]。当抽水蓄能电站正常运行时,进出水口前缘地形、进出水口体型是基本不变的,而进出水口水力要素是随电站运行而频繁变化的,因此进出水口水力要素与漩涡形成之间的对应关系一直是研究热点。

进出水口水力要素主要包括:进出水口淹没深度、入流流速(或弗劳德数)、雷诺数、韦伯数、进出水

口前水流环量等^[8]。在试验研究和具体工程应用中,淹没水深较入流流速、水流环量等水力参数更直观、更易获得与控制,因此大多关于水力因素的控制条件一般由隐含入流流速(弗劳德数)或水流环量等参数的淹没水深来表示。淹没水深是研究立轴漩涡的一个重要水力参数,为避免发生贯通式吸气漩涡,进水口须保证足够的淹没深度 S 或相对淹没深度 S/D (S

为进出水口前缘淹没深度、 D 为进水口高度,见图 1)。

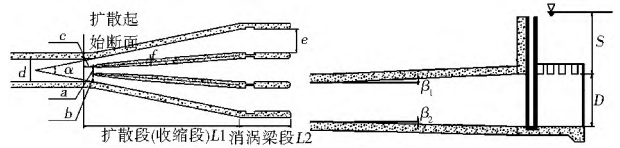


图 1 侧式进出水口体型参数

Fig. 1 Structure parameters of lateral inlet/outlet

表 1 淹没水深公式汇总

Tab. 1 Summary of submerged depth formulas

来源	公式	备注
戈登 ^[12]	$S > CuD^{0.5}$	D : 进出水口前缘孔口高度; u : 闸门处水流平均流速; C : 水流对称正向来流时为 0.543, 边界复杂或侧向来流时为 0.724。
斯里斯基 ^[13]	$S > CuD^{0.5}$	C : 水流对称正向来流时为 0.52, 边界复杂或侧向来流时为 0.7。
古宾 ^[14]	$S > 0.5m$ 且 $S > 1.5au^2/g$	a 为动能修正系数, 取值为 1.05~1.10; g 为重力加速度。
马吉明 ^[15]	$S > 4m$ 且 $S > 0.54uD^{0.5} - 0.81$ 无拦污栅墩 $S > 5.63m$ 且 $S > 1.143uD^{0.5} - 8.84$ 有拦污栅墩	对大流量、高流速水电站适用性好
胡去劣 ^[12]	$S > 2.7DFr^{0.35}$ $0.15 < Fr < 0.8$	
马吉明 ^[17]	$S > 2.388DFr - 0.01D$ $0.3 < Fr < 0.6$	
Daggett ^[18]	$S > 0.0175DNRe$ $Re < 5 \times 10^4$ $S > 75DN$ $Re > 5 \times 10^4$	Re : 雷诺数; N : 环量
陈云良 ^[9]	$S > 0.42DFr^2N^2$ $Fr > 0.8$	

对比表 1 中淹没水深经验公式,发现各家公式有所不同。分析认为主要是因为具体的研究对象边界条件、结构形式、运行条件等不同,在探寻临界淹没深度时考虑的影响因素及权重不同所致;另一方面则是由于试验条件、测量方法差异所致。但公式也呈现出了一定的共性,比如大部分公式考虑了进水口流速(或弗劳德数)的影响,有的公式还考虑了水流环量的影响。由于戈登公式源于实测资料的统计分析,更具普适性,且其形式简单,适用性较强,该公式已纳入我国水电站进水口设计规范^[19]。然而,经验公式只能提供初步参考,在实际工程中,还应根据具体工程特点,通过模型试验对经验值进行修正。Travis^[20]

采用 K 最近邻(k-Nearest Neighbor)分类算法,以文献[21]中工程原型侧式进出水口处 S/D 、 Fr ($0.18 \leq S/D \leq 6.09$, $0.06 \leq Fr \leq 1.90$) 为训练样本,构建了侧式进出水口漩涡形成概率的预测模型,并给出了以 S/D 、 Fr 为纵横坐标的漩涡形成概率聚类图。该方法为漩涡形成条件的研究提供了新的思路。

GORDON^[12]、Rindels 等^[21]、HECKER^[22]、Pennino 等^[23]、Reddy 等^[24]、Berm de 等^[25] 曾对部分国外电站进水口漩涡进行了观测与研究。为便于工程设计参考,表 2 统计了文献[26-33, 42-43, 47-48]中部分抽水蓄能电站侧式进出水口最小淹没深度及漩涡情况。

表 2 进出水口最小淹没深度及漩涡情况

Tab. 2 Minimum submerged depth and vortex condition of lateral inlet/outlet

电站名称	单机容量 / MW	单机最大发电流量 / (m ³ ·s ⁻¹)	单机最大抽水流量 / (m ³ ·s ⁻¹)	进出水口高度 D / m	最小淹没深度 S / m	防涡梁形式	漩涡情况
乌龙山上库	400	67.2	58.75	10.8	3.2	阶梯立式	无吸气漩涡
仙居下库	375	93.7	85.7	11	5	无	无吸气漩涡
敦化上库	350	62.43	51	8.5	6.5	矩形	无漩涡
荒沟上库	300	87.95	61.9	9	6.5	阶梯立式	无吸气漩涡
惠州上库	300	70.04	56.54	13	2.25	矩形	偶尔不吸气漩涡
丰宁上库	300	76.9	71.4	9	7	矩形	间歇性吸气漩涡
广州下库	300	68.25	55.58	9	3	矩形	间歇性微凹小漩涡
西龙池下库	300	54.18	46.76	6.5	4.43	矩形	偶尔微型小漩涡
泰安上库	250	132.2	112.32	13.5	5	阶梯立式	微凹小型漩涡
回龙下库	60	18.36	15.8	4.8	5.6	无	无漩涡

1.3 进出水口消涡方法

在工程实践中如若出现吸气漩涡,特别是贯通式吸气漩涡,对电站运行造成不利影响,就需要采取措施对漩涡运动进行抑制或消除。根据进出水口水流的成涡特点及决定因素,对消涡措施进行了广泛的研究,取得了不少成果,对进出水口的工程设计有很好的指导作用。

何学民等^[30]利用小型水工物理模型,对消涡措施进行了较为系统的研究,总结了3大类30余种消涡措施。这3类措施可分为:(1)合理设计进水口、胸墙、导墙位置和形式,减小进流角,设置专门的构筑物,如隔墙、翼墙、水平隔板、径向隔墩、导流板、盖板等;(2)安装专门结构物,如防涡梁、封闭式防涡格栅、漂浮式排筏、带孔口的防涡板、金属网、垂直消涡格栅等;(3)调整运行方式的消涡措施有:在事故闸门与进口相距较近时,可通过下降事故闸门,进而增加进口相对淹没水深的方式延缓或避免漩涡形成。Roshan等^[34]在Godar e Landar Dam水工模型试验中采用设置在进水口上方的消涡墙,有效减弱了进水口漩涡的强度。Amiri等^[36]通过研究不同来流角、淹没深度、流量大小对漩涡形成的影响,指出保证进水口前水流正向平稳均匀进流是抑制漩涡初生的关键,并在进水口上方设置水平孔板的措施抑制漩涡的形成。Martinerie等^[37]在德朗斯Nant de Drance和Lintl Limmern两座抽水蓄能电站模型试验中,提出了在Nant de Drance进水口顶部设置平板和在Lintl Limmern进水口上方设置防涡梁的消涡措施。倪汉根^[38]提出了通过采取措施使进水口漩涡区产生一个逆旋转反向漩涡,使二者水流环量对冲,消除漩涡的思想。邹敬民^[39]对比研究了斜梁式、梁格式及阶梯立式等十余种消涡措施的消涡效果,认为阶梯立式防涡梁是通过削弱不同高度水体的削弱作用来实现消涡的,是消除进水口前吸气漩涡的有效措施。胡去劣^[6]提出抑制漩涡形成归根结底是消除漩涡形成、发展的条件和动力,具体可从以下几方面入手:(1)优化进水口体型,选择适当的进口位置,保证进水边界对称性;(2)采用消涡栅、消涡梁等辅助措施,破坏有害涡的内部结构。(3)合理控制进口水流相对淹没度和水流弗劳德数,使其组合关系处在不出现有害漩涡的区间内。他还阐述了消涡栅的消涡原理,并通过试验确定了满足工程要求的消涡栅体型尺寸和布置形式。李书斌^[40]、王英奎^[9]、Hamed等^[41]指出前倾的胸墙比后仰的胸墙拥有更低的临界淹没水深下限,因此建议工程实际中采用前倾的胸墙设计。

将已有消涡措施概括为工程措施和非工程措施两类。工程措施为通过优化进出水口体型、进出水口前库区边界或设置特殊建筑物改善水流流态、抑制漩涡形成。非工程措施为通过调整运行方案,合理安排工况,保证进水口前有一定的淹没深度。存在多孔进水口时,尽可能使进水口对称进流。

需要指出的是,抽水蓄能电站为提高其综合效益,往往要充分利用库容,必然导致进出水口前较大的水位变幅,这就造成电站运行综合效益最大化与电站安全运行两者间的矛盾,面对这种矛盾,在具体工程中,人们常常选择充分利用库容以达到电站运行综合效益最大化,而通过合理设计进出水口体型、优化进水口边界条件、布设特殊的消涡建筑物等工程措施来抑制漩涡的形成,比较常用的是在进水口上方设置消涡梁,这种消涡方法也基本成为进出水口设计的惯例,在众多水电站侧式进出水口广泛采用,见表2。

2 进出水口水流均衡过渡问题

水流在进出水口段的流动为复杂的收缩流/扩散流(双向流),两种状态下进出水口中的流速分布、流量分配及水头损失差异显著。进出水口处水流能否均衡过渡主要与扩散段长度、水平和竖直扩散角大小、分流墩布设形式有关,体型设计见图1,而进出水口设计的合理程度则是由拦污栅断面处流速平均值 u 、流速不均匀系数 η (最大流速与平均流速比)及各通道流量分配率 φ 三要素来反映,文献[19]指出三要素的控制应以不使进出水口结构,特别是拦污栅产生破坏为准,给出了水流较均衡过渡条件下的三要素控制标准。

(1)进/出水口拦污栅处主流向平均流速 u 在0.6~1 m/s间;(2)拦污栅断面处主流向流速不均匀系数 η :进流时小于1.5,出流时小于2;(3)四通道时各通道流量分配率 φ 在22%~28%间;三通道时各通道流量分配率 φ 在30%~36%。

蔡付林等^[42]研究了7种分流墩方案对进出水口各孔口流速分布以及流量分配的影响,指出对于三墩四孔进出水口,库水位仅对扩散态水流有一定的影响,给出分流墩最优布设方案为:两侧分流墩宜始于扩散段起始断面,且两侧分流墩长于中间分流墩。黄智敏等^[43]对广州抽水蓄能电站下库进出水口进行了物理模型试验,指出边墩头部越靠近扩散段起始断面,出流时各孔口流量分配越均匀,入流时各孔口流量分配率与边墩头部位置关系不大,而与分流墩头处各过水通道面积大小关系密切。孙双科

等^[44]以张河湾抽水蓄能电站进出水口为例,研究了分流墩布置形式和扩散段体型对出流流速的影响,指出对于三墩四孔的侧式进出水口,采用中隔墩后移的“凹”型布置形式,对于改善扩散段内流速分布与消减负流有积极作用;在侧式进出水口出流时,拦污栅断面的流速分布除了受扩散段调控整流作用,还与圆变方段水流均匀程度有关,而圆变方处水流均匀程度受距圆变方较近的隧洞转弯段造成的不均匀流影响。章军军等^[45]对进出水口流速分布、水头损失等进行了物理模型试验与三维数值模拟,通过对分流墩、顶板和边墙等结构的体型优化,解决了出流时流态分布不均匀与水头损失系数偏大的问题。沙海飞等^[46]对某三孔侧式进出水口水流特性进行了三维紊流数值模拟研究,定量描述了来流不均性对进出水口水流均衡过渡的影响,优化了分流墩的布置形式。Ye F 等^[47]采用 Realizable- ϵ 紊流模型对三孔侧式进出水口扩散段水平和垂直扩散角对扩

散段顶部负流区的影响进行了研究,探讨了分流墩间距与各孔流量分配的关系。刘际军^[48]以具有 6 个侧式进出水口并排布置的抽水蓄能电站为背景,采用模型试验与数值模拟相结合的方法,研究了不同运行状态下侧式进出水口流速分布规律,指出扩散段与拦污栅之间的调整段对水流的进一步均衡调控起着重要作用。高学平等^[49]采用数值模拟方法对某电站侧式进出水口流量分配进行了研究,探讨了扩散段中、边孔宽度比、中墩墩头起始位置、扩散段长度及圆变方段长度与各孔道流量分配间的关系。

上述研究主要对非均衡过渡水流的优化方法及调控措施进行了探讨,表明合理的进出水口体型设计是水流均衡过渡的关键。表 3 统计了文献[26-33, 42-43, 47-48]侧式进出水口部分体型参数及过流特征数(注:表中部分字母定义见图 1,“-”表示数据缺失)。

表 3 进出水口体型及水流特征
Tab. 3 Structure and flow characteristics of lateral inlet/outlet

电站名称	广州下库	张河湾上库	蒲石河上库	荒沟上库	惠州上库	泰安上库	洪屏上库	丰宁上库	敦化上库	乌龙山上库	仙居下库
d/m	9	6.4	8	6.7	8.5	8	4	7	6.2	7.2	7.4
L_1/m	57.68	31.5	98	26.5	42.7	44.5	27.4	38	32	38.88	34
整流段/ m	9	12.4	0	0	0	0	0	15	0	21.6	7
L_2/m	9.6	7.8	10	12	13.16	11.6	10.8	11	12	10.8	0
$\alpha(^{\circ})$	34.4	-	5.67	14.63	34.88	-	35.23	25.5	30	29.82	34.32
$\beta_1(^{\circ})$	0	5.44	4.97	2.48	5.7	7	6.19	4.51	4.82	5.29	3.02
$\beta_2(^{\circ})$	0	0	0	2.48	0	0	0	0	0	0	3.02
D/m	13	9.5	16	9	13	13.5	9	10	8.5	10.8	11
e/m	7.5	-	7.5	6	7.5	6	4.5	5	4.6	6	6
a:b	23:27	23:27	50:50	50:50	22.5:27.5	22:28	-	22:28	22:28	-	-
墩头形式	凸型	平行	-	-	凹型	凸型	凹型	凹型	凹型	凹型	平行
f/m	-	-	1.5	1.5	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5	1.4	1.5
墩数	3	3	1	1	3	3	3	3	3	3	2
$w/(m \cdot s^{-1})$	-	-	0.83	2.23	0.72	-	-	0.66	0.64	0.94	0.91
η	-	-	1.48	1.31	1.4	-	-	1.33	1.23	1.23	1.24
$\varphi(\%)$	22.9~27.4	25.43~29.89	-	49~51	23~27	-	-	22.10~27.90	20.66~29.39	22.06~27.33	31.5~35.2
主流位置	边孔				边孔			边孔	边孔	边孔	边孔
$w/(m \cdot s^{-1})$	0.69	0.77	0.72	-	0.58	-	0.88	0.78	0.71	1.13	0.99
η	1.81	2.26	1.5	1.6	2.46	1.26	1.98	1.58	2.47	1.74	1.7
$\varphi(\%)$	22.8~26.5	25.56~26.44	-	49~51	23~27	23.6~26.4	22.25~27.25	22.24~27.76	22.53~27.67	21.83~28.07	30.5~37.4
主流位置	中孔				中孔	边孔	中孔	中孔	中孔	中孔	中孔

总结表 3 不同工程进出水口体型参数,结合广大学者研究成果中推荐的较优方案,认为在经济及施工条件满足的前提下,参考下列控制指标进行侧式进出水口的初步体型设计,能较大程度地满足文献[19,

42]定义的水流均衡过渡要求。对于重要工程和地形、水流或运行条件较为特殊的进出水口,条件满足的前提下,应开展数值计算或物理模型试验,以验证设计的合理性或推荐不合理设计的优化方案。

(1)扩散段长度取4~7.5倍隧洞直径,防涡梁段长度不小于1.1倍隧洞直径,若存在整流段,其长度宜为1~3倍隧洞直径;(2)水平总扩散角小于 36° ,单孔扩散角小于 10° ,顶板、底板扩散角在 $2.5^\circ\sim 5.5^\circ$ 间;(3)进/出水口高度不小于1.4倍隧洞直径,单孔过水通道宽度为0.7~0.9倍隧洞直径;(4)分流墩最好采用直线形,墩宽为1.3~1.5m之间,墩头采用狭尖、圆弧或椭圆曲线形式,三墩时墩头宜采用“凹”形布置形式,墩头处中孔与边孔宽度比宜在23:27~22:28之间;两墩时墩头处中孔与边孔宽度比宜为30:35;(5)若进出水口前隧洞存在转弯段,其位置应距进出水口30~40倍隧洞直径。

3 进出水口水流水头损失

抽水蓄能电站侧式进出水口水头损失主要为局部水头损失,反映了水流流经进出水口的能量损耗,影响着电站能量转换效率,是衡量进出水口体型和水力条件的重要指标^[1]。进出水口水头损失主要与扩散段水平和垂直扩散角、来流均衡度及出口淹没水深等因素有关,在有分流墩构成的多通道进出水口中,各通道间流量、流速均匀分布程度是决定进出水口水头损失更为重要的因素。

表4 进出水口水头损失系数

Tab.4 Head loss coefficient of lateral inlet/outlet

电站名称	水头损失系数		电站名称	水头损失系数			
	进流	出流		进流	出流		
惠州	上库	0.34	0.39	沙河	上库	0.18	0.42
	下库	0.33	0.37	荒沟	上库	0.27	0.54
广州	上库	0.19	0.39	龙观	下库	0.30	0.46
	下库	0.22	0.40	十三陵	下库	0.26	0.33
宜兴	上库	0.18	0.48	西龙池	下库	0.23	0.33
	下库	0.15	0.43	丰宁	上库	0.21	0.34

表4为部分抽水蓄能电站进出水口水头损失系数。一般情况下,进出水口在进流时为渐缩流动,水流易于控制,较为平顺,水头损失较小,系数一般在0.15~0.35之间变化;在出流时为渐扩流动,水流较难控制,易出现不利流态,水头损失较大,系数一般在0.3~0.6之间^[39]。

4 结语

文章对已有的抽水蓄能电站侧式进出水口水力

学问题及结构优化措施等方面的研究加以总结,介绍了漩涡形成机理、诱涡因素、消涡措施及进出口段水流均衡过渡和水头损失等方面的研究成果;总结了避免产生贯通式吸气漩涡的淹没水深要求,列举了部分工程实例;明确了水流均衡过渡标准及合理结构体型的参数选取标准,列举了具体工程中进出水口体型参数设计及过渡水流特征数;统计了部分侧式进出水口进出流水头损失系数。

抽水蓄能电站侧式进出水口水力学问题错综复杂,已有研究大都针对解决具体工程问题,尚缺乏一般性、系统性的研究成果。目前,我国抽水蓄能电站事业发展方兴未艾,特别是大流量、高水头抽水蓄能电站的日益增多,对进出水口的结构形式及水流均衡过渡问题的研究仍将是未来一段时间内的热点。文章认为还应加强以下几方面的研究:

(1)由于影响漩涡形成的因素很多,涉及库区地形、进出水口体型、水流物理特性及动力特性、淹没水深等,漩涡形成机理及吸气漩涡的挟气机理的研究还有待进一步深化。

(2)还应完善进出水口漩涡运动的模拟技术。对于物理模拟,应系统分析缩尺效应造成模型与原型结果差异的原因,确定影响漩涡缩尺效应的关键因素,探寻原型与模型之间的相似转换关系;对于数值模拟,由于漩涡的复杂结构及吸气漩涡挟气机理不甚明确,计算方法、边界条件、网格划分、水气面处理等关键问题还需进一步研究。

(3)在多沙河流修建抽水蓄能电站时,应对进出水口前泥沙淤积问题予以足够的重视,在进出水口体型设计中,应充分考虑抑制超标泥沙进入进出水口的措施。

参考文献(References):

- [1] 梅祖彦. 抽水蓄能发电站技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000. (MEI Y Z. Technology of pumped storage power station [M], Beijing: China Standards Press, 2000. (in chinese))
- [2] 郑双凌, 马吉明, 陈浩波, 等. 进水口漩涡特性及临界淹没水深的研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 129-132. (ZHENG S L, MA J M, CHEN H B, et al. Review of vortices and critical submergence at intakes[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 129-132. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2010.05129.
- [3] HAMED S, AMIR R Z, REZA R. Effect of intake head wall and trash rack on vortices[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(1): 108-112. DOI: 10.1080/00221680903565952.
- [4] 叶建军. 抽水蓄能电站侧式进出水口出流水流特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (YE J J. The research on outflow characteristic of flank inlet outlet in pumped storage station[D],

- Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese) DOI: 10.7666/d.y1128744.
- [5] 党媛媛, 韩昌海. 进水口漩涡问题研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2009(1): 90-94. (DANG Y Y, HAN C H. Review of vortices at intakes[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009(1): 90-94. (in Chinese) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2009.01.023.
- [6] 陈云良. 进水口前立轴旋涡水力特性的研究[D]. 四川大学, 2006. (CHEN Y L. Research hydraulic characteristics of vertical vortex at hydraulic intakes[D]. Sichuan University, 2006. (in Chinese) DOI: 10.7666/d.y1002268.
- [7] 严根华, 陈发展, 胡去劣. 进水口漩涡及消涡栅试验研究[A]. 第三届全国水力学与水利信息学大会论文集, 2007: 6. (YAN G H, CHEN F Z, HU Q L. Experimental study of inlet vortex and vortex eliminating lattice[A]. The third national conference conference of hydraulic and water conservancy information, 2007: 6. (in Chinese))
- [8] 杜敏. 进水口漩涡形成机理及缩尺效应[D]. 天津: 天津大学, 2008. (DU M. Formation mechanisms and scale effects of hydraulic intake vortices[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese) DOI: 10.7666/d.y1531773.
- [9] 王英奎. 立轴漩涡的力学特性与防控措施研究[D]. 北京: 清华大学, 2011. (WANG Y K. Mechanical characteristics and the control measurement for the vertical vortex[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [10] NEVZAT Y, FIKRET K. Critical submergence for intakes in open channel flow[J]. Hydr. Eng, 1995, 121(12): 900-905. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:12(900)
- [11] SUERICH-GULICK F, GASKIN S J, VILLENEUVE M, et al. Characteristics of free surface vortices at low-head hydropower intakes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(3): 291-299. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000826.
- [12] GORDON J L. Vortices at intakes structures[J]. Water Power, 1970(4): 137-138.
- [13] 斯里斯基, 毛世民, 杨立信. 高水头水工建筑物的水力计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (S. S. MAO S M, YANG L X. Hydraulic calculation of high head hydraulic structure[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1984. (in Chinese))
- [14] 徐锐. 水力发电站[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (XU R. Hydroelectric power station[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1983. (in Chinese))
- [15] 马吉明, 刘德朝. 小斜式进水口临界吸气深度的水力试验研究[J]. 水利水电技术, 1997, 11: 52-56. (MA J M, LIU D C. Hydraulic research of critical inspiratory depth before small bevel type inlet[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997, 11: 52-56. (in Chinese) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.1997.11.013.
- [16] 胡去劣. 进水口漩涡的试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1982(3): 22-35. (HU Q L. Experimental study of vortex formation at the intake of conduits[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1982(3): 22-35. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.1982.03.003.
- [17] 马吉明, 梁元博. 电站双孔进水口临界淹没水深的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000(5): 122-124. (MA J M, LIANG Y B. Critical submergence of double entrance power intakes[J]. Journal of Tsinghua University (Science And Technology), 2000(5): 122-124. (in Chinese))
- [18] DAGGETT L L, KEULEGAN G H. Similarity in free surface vortex formation[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1974, 100: 1565-1581.
- [19] DL/T 5398-2007, 水电站进水口设计规范[S]. (DL/T 5398-2007, Design specification at hydropower station inlet[S]. (in Chinese))
- [20] TRAVIS Q B, MAYS L W. Prediction of intake vortex risk by nearest neighbors modeling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(6): 701-705. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000344.
- [21] RINDELS A J, GULLIVER J S. An experimental study of critical submergence to avoid free surface vortices at vertical intakes[J]. St Anthony Falls Laboratory, 1983.
- [22] HECKER, G. E. Model-prototype comparison of free surface vortices[J]. Journal of the Hydraulics Division ASCE, 1981, 107(10): 1243-1259
- [23] PENNING B J, HECKER, G. E. "A synthesis of model data for pumped storage intakes" D. Webb and C. Papadakis, eds., Pump Turbine Schemes: Planning, Design, and Operation, Proceeding of the Joint ASME/CSME Applied Mechanics, Fluids Engineering and Bioengineering Conference, June, 1979.
- [24] REDDY & PIEK FORD. Vortices at intakes in conventional sumps[J]. Water Power 1972(3).
- [25] BERMÚDEZ M, CEA L, PUERTAS J, et al. Hydraulic model study of the intake outlet of a pumped storage hydropower plant[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2017, 11(1): 483-495. DOI: 10.1080/19942060.2017.1314869.
- [26] 邹敬民, 高树华, 李宝红, 等. 荒沟抽水蓄能电站上池侧式进口和出口水力学试验研究[J]. 水利水电技术, 1999(3): 42-44. (ZOU J M, GAO S H, LI B H, et al. Study of hydraulic testing of side inlet and outlet at upper reservoir of huangou pumped storage power station[J]. Water Resources And Hydropower Engineering, 1999(3): 42-44. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.1999.03.013.
- [27] 张从联, 朱红华, 钟伟强, 等. 惠州抽水蓄能电站下库进出水口水工模型试验研究[J]. 人民珠江, 2003(6): 10-14. (ZHANG C L, ZHU H H, ZHONG W Q, et al. Hydraulic modelling of inlet/outlet of lower reservoir for huizhou pump storage plant[J]. Pearl River, 2003(6): 10-14. (in Chinese))
- [28] 邵颖, 宋修昌, 刘国玉. 回龙抽水蓄能电站下库进出水口体型研究[J]. 人民黄河, 2004(7): 37-45. (SHAO Y, SONG X C, LIU G Y. Study on types of intakes and outlets located at lower reservoir of huilong pumped storage plant[J]. Yellow River, 2004(7): 37-45. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2004.07.016.
- [29] 张从联, 朱红华, 钟伟强, 等. 抽水蓄能电站进出水口水力学试

- 验研究[J].水力发电学报,2005(2):60-63.(ZHANG C L, ZHU H H, ZHONG W Q, et al. Experimental research on inlet/outlet hydraulics of pump storage power plants[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005(2): 60-63. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243.2005.02.013.
- [30] 叶飞.抽水蓄能电站侧式进/出水口水力特性研究[D].天津:天津大学,2006.(YE F. Study on the hydraulic characteristics at the side inlet/outlet of the pumped storage plant[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese))
- [31] 潘钦.抽水蓄能电站拦污栅流激振动研究[D].大连:大连理工大学,2007.(PAN X. Study on flow-induced vibration of trashracks of pumped storage hydroelectric plants [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [32] 张新伟.抽水蓄能电站侧式进/出水口设计研究及CFD模拟[D].成都:西华大学,2008.(ZHANG X W. Study on hydraulic design and CFD numerical simulation for side inlet outlet of pumped storage power stations[D]. Chengdu: Xi Hua University, 2008. (in Chinese))
- [33] 苏曼,高学平.抽水蓄能电站进/出水口体型优化数值模拟[J].南水北调与水利科技,2011,9(5):95-98.(SU M, GAO X P. 3D Numerical simulation of intake/outlet of pumped storage plant. [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 95-98. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.05095.
- [34] 何学民,汝树勋.水工建筑物进水口自由表面漏斗漩涡消除措施的试验研究[J].四川水力发电,1992(3):38-43.(HE X M, RU S X. Experiment study on measures for eliminating free surface cone vortex at intake of hydraulic structures[J]. Sichuan Water Power, 1992(3): 38-43. (in Chinese))
- [35] ROSHAN R, SARKARDEH H, ZARRATI A R. Vortex study on a hydraulic model of Godar e Landar Dam and Hydropower Plant[C]// Multiphase Flow. 2009: 217-225. DOI: 10.2495/MPF090191.
- [36] MARTINERIE R, MÜLLER M, CESARE G D, et al. Vortices at intake works of pump storage schemes [C]// 6th ISUD-International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering [A]. Czech Technical University in Prague Institute of Hydrodynamics AS CR, v. v. i. 2008: 534-544.
- [37] ZARRATI A R, SARKARDEH H, AMIRI S M, et al. Surface vortex prevention at power intakes by horizontal plates[J]. Water Management, 2011, 164(4): 193-200. DOI: 10.1680/wama.1000009.
- [38] 倪汉根,杨玉庆.消除进水口前漩涡漏斗的一个方法[J].水利学报,1986(12):52-56.(NI H G, YANG Y Q. One way to eliminate water inlet before vortex funnel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(12): 52-56. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.1986.12.007.
- [39] 邹敬民,高树华,于艳丽,等.进水口防涡措施研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2000(4):463-466.(ZOU J M, GAO S H, YU Y L, et al. Research of vortex preventing measures of water inlet[J]. Journal of Hydrodynamics, 2000(4): 463-466. (in Chinese)) DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2000.04.009.
- [40] 李书斌.进水口漩涡影响因素研究[D].天津:天津大学,2009.(LI S B. Research on the influencing factors of vortex at hydraulic intakes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [41] HAMED S, AMIR R Z, REZA R. Effect of intake head wall and trash rack on vortices[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(1): 108-112. DOI: 10.1080/00221680903565952.
- [42] 蔡付林,胡明,张志明.双向水流侧式进出水口分流墩研究[J].河海大学学报(自然科学版),2000(2):74-77.(CAI F L, HU M, ZHANG Z M. Study on guide piers in flank inlet outlet with double flow directions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2000(2): 74-77. (in Chinese))
- [43] 黄智敏,何小惠,朱红华,等.广州抽水蓄能电站下库进出水口试验研究[J].水电能源科学,2005(1):4-7.(HUANG Z M, HE X H, ZHU H H, et al. Experimental research on inlet/outlet of low reservoir at guangzhou pumped storage plant[J]. Water Resources and Power, 2005(1): 4-7. (in Chinese))
- [44] 孙双科,柳海涛,李振中,等.抽水蓄能电站侧式进/出水口拦污栅断面的流速分布研究[J].水利学报,2007(11):1329-1335.(SUN S K, LIU H T, LI Z Z, et al. Study on velocity distribution behind the trashrack in lateral intake outlet of pumped storage power station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(11): 1329-1335. (in Chinese))
- [45] 章军军,毛根海,程伟平,等.抽水蓄能电站侧式短进出水口水力优化研究[J].浙江大学学报(工学版),2008(1):188-192.(ZHANG J J, MAO G H, CHENG W P, et al. Hydraulic shape optimization on lateral inlet/outlet of pumped storage plant[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008(1): 188-192. (in Chinese))
- [46] 沙海飞,周辉,黄东军.抽水蓄能电站侧式进/出水口数值模拟[J].水力发电学报,2009(1):84-88.(SHA H F, ZHOU H, HUANG D J. Numerical simulation on the side inlet outlet of pumped storage power station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009(1): 84-88. (in Chinese))
- [47] YE F, GAO X P. Numerical simulations of the hydraulic characteristics of side inlet/outlets[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2011, 23(1): 48-54. DOI: 10.1016/S1001-6008(10)60087-X.
- [48] 刘际军.抽水蓄能电站进/出水口双向水流特性研究[D].天津:天津大学,2015.(LIU J J. Study on two direction flow characteristics for inlet/outlet of pumped storage plants[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese))
- [49] 高学平,李岳东,田野,等.抽水蓄能电站侧式进/出水口流量分配研究[J].水力发电学报,2016(6):87-94.(GAO X P, LI Y D, TIAN Y, et al. Flow distribution in side intake/outlet tunnel of pumped storage power stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016(6): 87-94. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdx.20160611.